

УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ И УСЛОВИЯ ТРЕНИЯ ДЛЯ ПОРОШКОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ¹

В работе [1] авторами было показано, что соотношения между напряжениями и деформациями в случае медленного пластического течения металлических порошков можно представить в виде

$$T = T(\Lambda, \rho_0, \varepsilon); \quad \sigma = \sigma(\Lambda, \rho_0, \varepsilon); \quad (1)$$

где T — интенсивность касательных напряжений; σ — первый инвариант тензора напряжений; Λ — степень деформации сдвига; ε — степень деформации объема; ρ_0 — плотность материала до деформации.

Авторы работ [1] и [2] независимо друг от друга разработали методику получения физических уравнений связи типа (1) для металлических порошков и гранул, заключающуюся в математической обработке результатов осадки цилиндрических образцов с различной начальной плотностью.

Следует отметить значительное влияние наклепа частиц металлического порошка на характер кривых, связывающих напряжения и деформации. Такое положение высказывает большое число исследователей [3—5 и др.]. Влияние фактора деформационного упрочнения в зависимостях (1) учитывает степень сдвиговой деформации Λ .

Порошки твердых сплавов представляют собой смеси керамической составляющей (карбиды и нитриды металлов) и металлического порошка-связки. Как правило, порошки-связки содержатся в значительно меньших количествах, чем керамическая составляющая. Керамические частицы, обладающие высокими прочностью и твердостью, в процессе формования изделия пластически не деформируются. В соответствии с этим можно предположить, что упрочнение твердосплавных смесей в целом при их формовании происходит, в основном, за счет изменения плотности, что отмечают, например, и авторы работы [6]. По мнению авторов [12], частицы металла-связки не могут упрочняться при давлениях прессования вследствие высокого наклепа, полученного ими при размоле в шаровой мельнице.

Таким образом, при пренебрежении наклепом частиц металла-связки в результате сдвиговой деформации формулы (1) для порошков твердых сплавов можно записать

$$T = T(\varepsilon, \rho_0); \quad \sigma = \sigma(\varepsilon, \rho_0); \quad (2)$$

Такие зависимости можно получить при гидростатическом сжатии порошков с различной исходной плотностью. Поскольку опыты

Работа выполнена под руководством В. Л. Колмогорова

с приложением гидростатического давления довольно сложны, то их можно заменить экспериментами прессования порошка в цилиндрической пресс-форме. В этом случае формулы для расчета ε , T , σ приобретают вид [1, 8]

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}; T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{zz} (1 - \chi); \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{zz} (1 + 2\chi), \quad (3)$$

где h_0 и h — высоты прессовки до и после деформации; σ_{zz} — удельное давление прессования; χ — коэффициент бокового давления.

В работе [7] получены зависимости $\sigma_{zz} = f(\rho)$, для двух порошков твердых сплавов с различным количеством добавок-пластификаторов. Для приведения их к виду (2) необходимо воспользоваться формулами (3), а также соотношением

$$\varepsilon = \ln \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (4)$$

вытекающим из уравнения неразрывности.

В работе [9] исследовано распределение давления на стенки контейнера при прессовании смесей карбида вольфрама с кобальтом. Используя эти данные, можно получить усредненное значение величины χ как среднего интегрального отношений бокового и удельного давлений прессования по формуле

$$\chi = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}} dz. \quad (5)$$

Ниже представлены значения коэффициентов бокового давления для ряда порошков твердых сплавов, рассчитанные по данным работы [9] с использованием формулы (5). Следует отметить, что в интервале давлений 8—15 кгс/мм² расчет показал слабую зависимость усредненного коэффициента бокового давления от величины прикладываемого давления:

Порошок	ВК-0	ВК-2	ВК-15	ВК-30	ВК-60
χ	0,37	0,36	0,36	0,41	0,46

Авторы подвергли исследованию порошки сплава ВК-6 поставки Кировградского завода твердых сплавов. Сплав ВК-6 является одним из наиболее распространенных твердых сплавов для изготовления мелкосортных изделий и обладает в спеченном состоянии оптимальным соотношением эксплуатационной прочности и износостойкости.

Навески из порошков помещались в цилиндрическую пресс-форму $\varnothing 25$ мм, отношение начальной высоты прессовки к диаметру $h_0/d = 1,0$. В ходе прессования измерялись высота прессовки h по ходометру и усилие прессования P по динамометру испы-

тательной машины. Расчет σ_{zz} и ρ прессовки производился по формулам

$$\sigma_{zz} = \frac{4P}{\pi d^2}; \quad \sigma_{zz} = \frac{4G}{\pi d^2 h}, \quad (6)$$

где G – вес прессовки.

На рис. 1 изображены зависимости $\sigma_{zz} = f(\rho)$, для порошка ВК-6 гравиметрической плотности $\rho_0 = 4,15 \text{ г/см}^3$ и гранулированной сме-

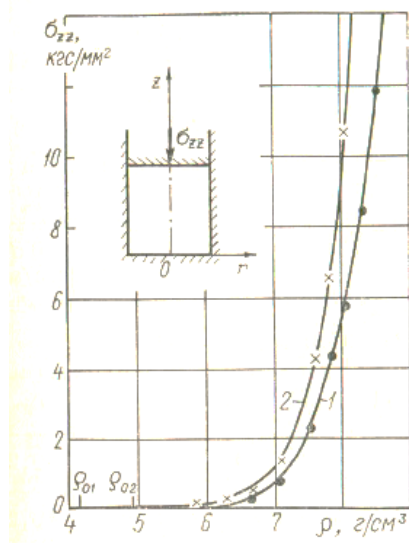


Рис. 1. Зависимости $\sigma_{zz} = f(\rho)$ для негранулированного (1) и гранулированного (2) порошков ВК-6

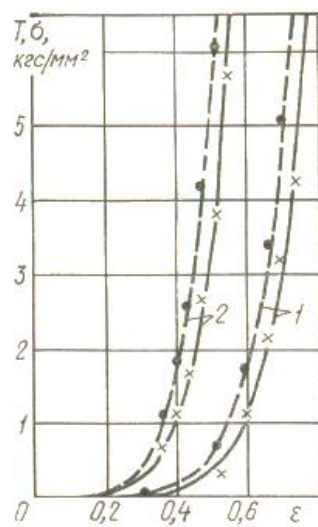


Рис. 2. Зависимости T (—) и σ (---) от ϵ для негранулированного (1) и гранулированного (2) порошков ВК-6

си ВК-6 с $\rho_0 = 4,95 \text{ г/см}^3$. Видно, что в интервале рабочих давлений прессования для деформации гранулированной смеси необходимо приложить давление примерно вдвое более высокое, чем для деформации негранулированной смеси той же плотности. Это, очевидно, связано с необходимостью затраты энергии на разрушение гранул (чего не требуется при деформации собственно порошка).

Для приведения зависимостей $\sigma_{zz} = f(\rho)$ к виду (2) воспользуемся соотношениями (3). Как видно из вышеприведенного анализа данных источника [9], коэффициент χ при содержании кобальта в порошке твердого сплава от 2 до 15% не зависит от марки сплава и равен 0,36.

На рис. 2 в виде точек нанесены значения T и σ в зависимости от ϵ для двух видов порошков ВК-6 с различной исходной плотностью. Логарифмическое выравнивание показало, что зависимости могут быть аппроксимированы степенными функциями вида

$$\sigma = a\epsilon^b; \quad T = c\epsilon^b. \quad (7)$$

Определение значений коэффициентов a , b и c производилось по методу наименьших квадратов [11] (табл. 1), для чего решалась система нормальных уравнений вида

$$na + b \sum_{i=1}^n \ln \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \ln \sigma_i; \quad (8)$$

$$a \sum_{i=1}^n \ln \varepsilon_i + b \sum_{i=1}^n \ln^2 \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \ln \varepsilon_i \ln \sigma_i; \quad (8a)$$

$$c = \sqrt{3} \frac{1-\chi}{1+2\chi} a, \quad (9)$$

где n — число замеров.

Расчет коэффициентов уравнения (7)

ε	$\ln \varepsilon$	$\sigma_{\text{оп}},$ кгс/мм ²	$\ln \sigma$	$\ln^2 \varepsilon$	$\ln \varepsilon \ln \sigma_{\text{оп}}$	$\sigma,$ кгс/мм ²	$\delta \sigma,$ кгс/мм ²
Негранулированный порошок ВК-6, $\rho_0=4,15$ г/см ³							
0,31	-1,171	0,02	—3,912	1,371	4,581	0,02	0
0,53	-0,635	0,46	-0,777	0,403	0,493	0,72	—0,26
0,59	—0,528	1,74	0,554	0,279	—0,292	1,51	-0,23
0,66	—0,416	3,42	1,230	0,173	—0,512	3,28	0,14
0,69	—0,371	5,02	1,613	0,138	—0,598	4,48	0,54
0,73	-0,315	6,73	1,907	0,099	—0,601	6,59	0,14
$\sum_{i=1}^6$	—3,436		0,615	2,463	3,071	—	—
Гранулированный порошок ВК-6, $\rho_0=4,95$ г/см ³							
0,36	—1,022	1,10	0,095	1,044	—0,097	1,05	0,05
0,40	-0,917	1,82	0,599	0,831	—0,549	1,79	0,03
0,43	—0,844	2,58	0,948	0,712	—0,800	2,53	0,05
0,47	—0,755	4,20	1,435	0,570	—1,083	3,97	0,23
0,51	-0,674	6,05	1,800	0,454	-1,213	5,87	0,18
0,54	—0,563	8,92	2,188	0,317	—1,232	10,17	—1,25
$\sum_{i=1}^6$	—4,775	—	7,065	3,928	—4,974	—	—

В табл. 2 представлены значения коэффициентов a , b , c . На рис. 2 графики, соответствующие аппроксимирующим функциям (7), нанесены в виде линий. Видно, что функции (7) удовлетворительно аппроксимируют опытные зависимости, о чем можно судить также по малым величинам абсолютных отклонений, представленным в табл. 1.

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов a , b , c

Порошок ВК-6	ρ_0 , г/см ³	a , кгс/мм ²	b	c , кгс/мм ²
Негранулированный	4,15	58,21	6,918	37,45
Гранулированный	4,95	164,02	4,931	105,80

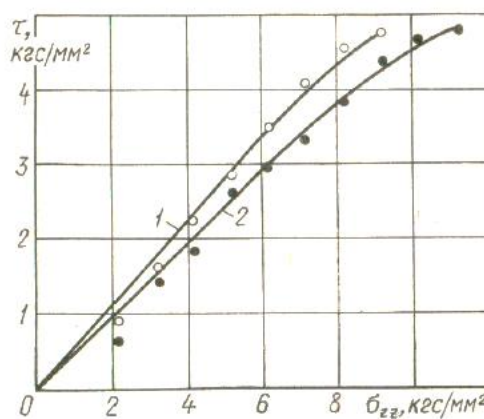
Для сравнения с литературными данными представим формулы (7) в виде зависимости удельного давления прессования от плотности

$$\sigma_{zz} = \frac{3a}{1+2\chi} \left(\ln \frac{\rho}{\rho_0} \right)^b. \quad (10)$$

Уравнение (10) удовлетворяет начальному условию прессования: при $\sigma_{zz}=0$ $\rho=\rho_0$.

В работе [7] авторами сделан вывод об удовлетворительном описании процесса прессования порошков твердых сплавов уравнением Кунина и Юрченко [10]. Однако это уравнение хорошо описывает связь между σ_{zz} и ρ лишь во второй стадии прессования, при развитых деформациях. Как отмечают сами авторы [10], для описания первой стадии прессования, т. е. при малых давлениях прессования, предложенное ими уравнение не годится. Кроме того, оно не удовлетворяет начальному условию прессования. Уравнение (10) не обладает этими недостатками.

В литературе отсутствуют какие-либо данные по условиям трения при деформации твердосплавных смесей. Для изучения этого фактора использовалась методика, предложенная Ждановичем в работе [4], для чего была изготовлена соответствующая установка. Отличие от установки, описанной в [4], заключалось в том, что с целью повышения точности измерений крутящий момент измерялся тензометрическим ключом. Для этого на рычаг ключа



Р и с . 3. Зависимости $\tau=f(\sigma_{zz})$ для порошков ВК-6 (точки — экспериментальные значения, линии — аппроксимирующие кривые):
О — негранулированная (1); • — гранулированная смесь (2); чистота поверхности инструмента V8.

наклеивались тензодатчики сопротивления, включенные в мостовую измерительную схему. Возникающий при изгибе рычага ток разбаланса усиливался, измерялся цифровым вольтметром и регистрировался цифropечатающим устройством. До и после эксперимента производилась тарировка установки путем нагружения ключа известной нагрузкой и получения зависимостей напряжения на выходе усилителя от крутящего момента $M_{кр}$.

Удельные силы трения рассчитывались по формуле [4]

$$\tau = \frac{12M_{кр}\eta}{\pi d^3}, \quad (11)$$

где $\eta = 0,99$ — КПД упорного подшипника.

На рис. 3 представлена зависимость $\tau=(\sigma_{zz})$ для двух видов твердосплавной смеси ВК-6. С достаточной степенью точности кривые аппроксимируются предложенной авторами [13] экспоненциальной зависимостью

$$\tau_1 = k_1[1 - \exp(-k_2\sigma_{zz})]. \quad (12)$$

Значения коэффициентов k_1 , и k_2 приведены в табл. 3 Уравнения связи напряжений и деформаций, а также условия трения в виде

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициентов k_1 , и k_2

Порошок ВК-6	k_1 , кгс/мм ²	k_2 , мм ² /кгс
Негранулированный	15,1	0,044
Гранулированный	10,5	0,057

зависимостей (7) и (12) могут быть использованы для расчета технологических параметров в процессах обработки давлением твердых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логинов Ю. Н., Шарафутдинов Н.Н., Колмогоров В. Л. «Технология легких сплавов. Бюллетень ВИЛС», 1977, № 4, с. 20.
2. Гун Г.Я., Полухин П.И., Фролов А.А. «Известия вузов. Черная металлургия», 1976, №3, 66.
3. Меерсон Г. А. «Порошковая металлургия», 1962, № 5, 3.
4. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М., «Металлургия», 1969, с.96.
5. Мартынова И.Ф., Скороход В.В., Солонин С.М. «Порошковая металлургия», 1974, №3, 40.
6. Середа Н. Н., Гавриленко А. П. «Порошковая металлургия», 1976, № 9, 11
7. Сапронов Е.Н. В кн.: Твердые сплавы. М., «Металлургия», 1973, с. 96. (Научн. тр. ВНИИТС, сб. № 12).
8. Колмогоров В.Л., Логинов Ю.Н. В кн. Обработка металлов давлением. Свердловск, изд. УПИ. 1977. (Тр. вузов Российской Федерации, вып.4), 84.
9. Меерсон Г.А., Ивенсен В.А., Сапронов Е.И., Виссарионов В.Б. «Порошковая металлургия», 1972, №2, 15-18.

10. Кунин Н. Ф., Юрченко Б. Д. «Порошковая металлургия», 1963, № 6, 3.
11. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., «Наука», 1967.
12. Бондаренко В. П., Джамаров С. С., Байденко А. А. «Порошковая металлургия», 1976, № 9, 11.
13. Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П. и др. Контактное трение в процессах ОМД. М., «Металлургия», 1976.